

## 波長1.1 $\mu\text{m}$ 帯超高速光パルス伝送技術に関する研究

著者	小泉 健吾
号	57
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4767号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/61525">http://hdl.handle.net/10097/61525</a>

氏 名	こいずみ けんご 小 泉 健 吾
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成25年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	波長 1.1 $\mu\text{m}$ 帯超高速光パルス伝送技術に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 中沢 正隆
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 八坂 洋 東北大学教授 尾辻 泰一 東北大学准教授 廣岡 俊彦

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

近年、インターネットの通信トラフィック量は年率 40 % で増大しており、2009 年には 1 Tbit/s に到達し、20 年後には 1 Pbit/s を超えると予想される。現在光通信で用いられている波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯においては、光ファイバへ入射可能なパワーおよび光増幅器の利得帯域などの物理的な要因により、その伝送容量が 100 Tbit/s に制限されるということが分かってきた。そこで、新たな光通信用波長帯として、波長 1.1  $\mu\text{m}$  帯に高い関心が寄せられている。波長 1.1  $\mu\text{m}$  帯は、イッテルビウム(Yb)を用いた広帯域かつ高利得な光増幅器として Yb 添加光ファイバ増幅器(Yb-Doped Fiber Amplifier)が使用可能であるため、超大容量光伝送の実現が期待されている。さらに波長 1.1  $\mu\text{m}$  帯では YDFA だけでなく光源、伝送路、受光器などの光デバイスの研究開発も進んでおり、これまでにフォトニック結晶ファイバ(PCF: Photonic Crystal Fiber)を用いた単一チャネル 40 Gbit/s の伝送実験が実現されている。しかしながら、本波長帯では 100 Gbit/s を超える高速光伝送はまだ実現されていないのが現状である。

本研究では、1.1  $\mu\text{m}$  帯において 40 Gbit/s/ch を超える超高速光伝送を実現するために、ピコ秒光パルス光源を用いた光時分割多重(OTDM: Optical Time Division Multiplexing)伝送を導入した。OTDM 伝送を実現するために、高安定ピコ秒パルス光源、伝送路の群速度分散(GVD: Group Velocity Dispersion)および分散スロープ補償、ならびに超高速多重分離などの基盤技術を開発した。その結果、波長 1.1  $\mu\text{m}$  帯において 1 Tbit/s/ch を上回る超高速光伝送を実現し、波長 1.1  $\mu\text{m}$  帯における大容量伝送の可能性を実証している。

### 第2章 波長 1.1 $\mu\text{m}$ 帯高調波再生モード同期イッテルビウムファイバレーザ

本章では OTDM 伝送を実現するためのピコ秒パルス光源として、高調波再生モード同期 Yb ファイバレーザの作製について述べている。図 1 にモード同期 Yb ファイバレーザ(Yb MLFL: Mode-Locked Yb Fiber Laser)の

構成を示す。本レーザでは、特にソリトン効果を導入することで光パルスの短パルス化を図っている。ソリトンレーザ動作を実現するには、共振器内の平均分散値を異常分散領域に設定する必要があるが、共振器を構成するステップインデックスファイバ(SIF: Step Index Fiber)は、波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯ではシリカガラスの材料分散に起因する大きな正常分散を有している。そのため、異常分散を有する媒質として PCF を選択し、これを共振器内に挿入することで平均ソリトンレーザ動作を実現した。その結果、最短で

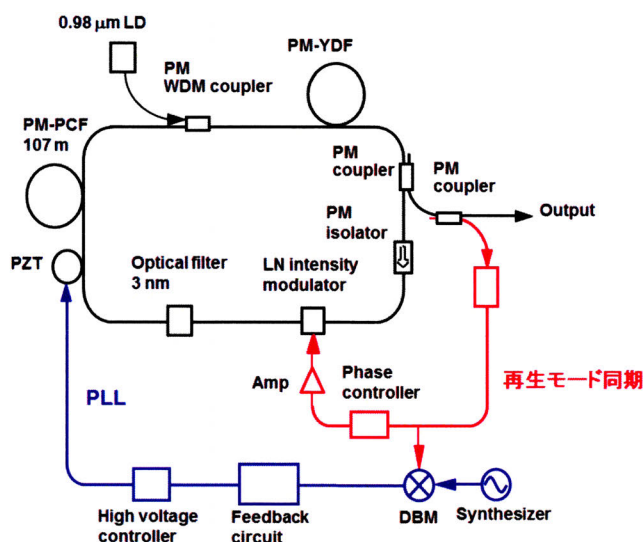


図1 Yb MLFL の構成

$1.1\ \text{ps}$  のトランスフォームリミットな sech 型光パルスの生成に成功した。また、本レーザは高調波再生モード同期によるパルス発振の安定化と PLL 動作による繰り返し周波数の安定化を行うことで、 $140\ \text{fs}$  の低ジッタ特性を実現している。本レーザは  $1.1\ \mu\text{m}$  帯における超高速通信用光源としてだけでなく、光計測・標準用光源としても大変有用である。

### 第3章 波長 $1.1\ \mu\text{m}$ 帯 OTDM 伝送のための要素技術

本章では、波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯の OTDM 伝送のための要素技術について述べている。波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯で利用できる単一モード・低分散光ファイバ伝送路として高屈折率 SIF、PCF およびホールアシストファイバ(HAF: Hole Assisted Fiber)がある。PCF や HAF は空孔構造を最適に設計することで分散特性を制御できるという特徴を有しており、波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯で低分散な特性を実現することができる。しかしながら、その構造は SIF よりも複雑であるため偏波モード分散(PMD: Polarization Mode Dispersion)が大きく、これが長距離伝送にとって障害となると予想される。したがって、本研究では PMD の小さい SIF を伝送路として選択した。この SIF の伝送損失を補償するための光中継器として利得  $30\ \text{dB}$ 、帯域  $30\ \text{nm}$  以上の特性を有する YDFA を作製している。また、超短光パルス伝送では GVD および分散スロープによる波形歪の影響が OTDM 伝送の性能の劣化要因となり、伝送距離が制限されてしまう。本研究では、SIF の大きな正常分散を補償できるデバイスとしてチャープファイバブラッググレーティング FBG (Fiber Bragg grating)を採用しており、これにより SIF  $20\ \text{km}$  に相当する分散を補償することができる。一方、分散スロープ補償には位相変調器を用いたプリチャープ技術が有効であることを明らかにしている。最後に OTDM 信号の多重分離回路として非線形ファイバループミラー(NOLM: Nonlinear Loop Mirror)を作製し、 $160 \rightarrow 10\ \text{Gbit/s}$  への多重分離を実現した。

## 第4章 波長 1.1 $\mu\text{m}$ 帯 160 Gbit/s/ch-300 km 伝送

本章では第3章で述べた要素技術を組み合わせて 160 Gbit/s/ch OTDM 伝送実験を行い、その結果について述べている。160 Gbit/s/ch OTDM 伝送実験の構成を図 2(a)に示す。Yb MLFL からの 10 GHz, 2.3 ps の光パルスを LN 強度変調器を用いて OOK (On-Off Keying) のデータ変調を与えた。10 Gbit/s データ信号は YDFA で増幅後に分散スロープ補償回路でプリチャープを与えた後、光時分割多重回路により 160 Gbit/s OTDM 信号を生成し伝送路へ入射した。伝送路は GVD 補償器の分散量に上限があるため、1 周 20 km のループ伝送路を構成し伝送距離の拡大を図った。SIF 100, 200 および 300 km 伝送後の誤り率(BER: Bit Error Rate)測定結果を図 2(b)に示す。GVD および分散スロープ補償を高精度に行うことで SIF 100 km において  $10^{-9}$  以下のエラーフリー特性を達成した。さらに、伝送距離を拡大し OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) の限界となる 300 km の長距離伝送において FEC リミット( $2 \times 10^{-3}$ )以下となる BER 特性を達成した。

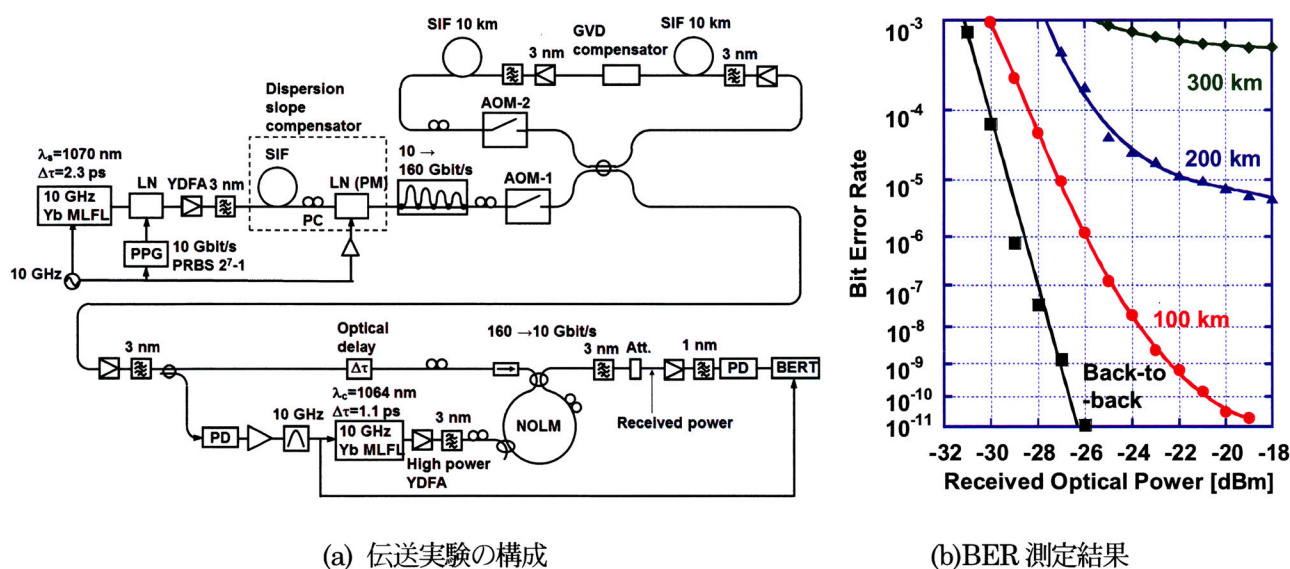


図2 波長 1.1  $\mu\text{m}$  帯 160 Gbit/s/ch OTDM 伝送実験

## 第5章 320 Gbit/s/ch ~ 1.28 Tbit/s/ch への高速化

本章では OTDM 多重度の増大ならびに偏波多重方式の導入によるテラビットへの高速化について述べている。具体的にはまず、640 Gbit/s/ch 伝送用の光源としてサブピコ秒光パルス列の生成を行った。これは、Yb MLFL からの光パルスを異常分散を有する PCF に高出力で入射することで、高次ソリトン効果によるパルス圧縮を行い、その結果 650 fs の光パルスを生成した。この超短光パルスに伴う GVD および分散スロープ補償についてそれぞれの補償回路を改良している。具体的には、GVD では広帯域のチャープ FBG を 2 本連続接続することで、その分散量の増大を、分散スロープ補償では往復型の LN 位相変調器を用いることで、そのチャープ量の増大を



図っている。また、多重分離用の NOLM においても制御光の狭窄化と高非線形ファイバの短尺化を行うことで、320 および 640 Gbit/s 信号の多重分離に対応するように高速化した。以上の要素技術の最適化を行い OTDM 伝送の高速化を行った結果 320 Gbit/s/ch-161 km、640 Gbit/s-58 km においてそれぞれ FEC リミット( $2 \times 10^{-3}$ )以下の誤り率を達成した。しかしながら、この時分散スロープ補償後のパルス幅が十分に戻っておらず、これが伝送性能劣化の主な要因となっていた。これは LN 位相変調器によるプリチャープで不必要に与えられる 5 次の位相シフト成分によるものであることを明らかにし、これを解決するために新たに分散スロープ補償の広帯域化を提案した。具体的には、往復型 LN 位相変調器 2 台を連続に接続しチャープ量を増大するとともに、20 GHz の位相変調を意図的に組み合わせることで 5 次の位相シフト成分を除去した。その結果、640 Gbit/s/ch において FEC リミット以下が得られる伝送距離を 81 km まで拡大した。さらに、図 3(a)に示す 1.28 Tbit/s/ch 偏波多重伝送系を構成し、58 km 伝送に初めて成功した(図 3(b))。

## 第6章 結論

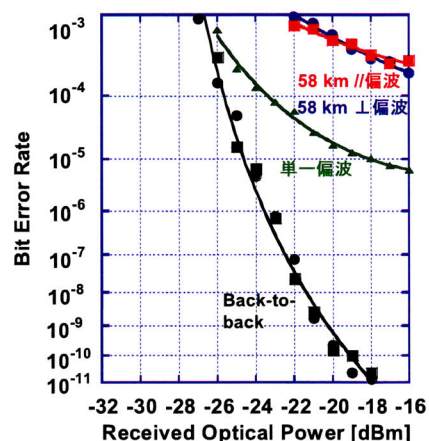
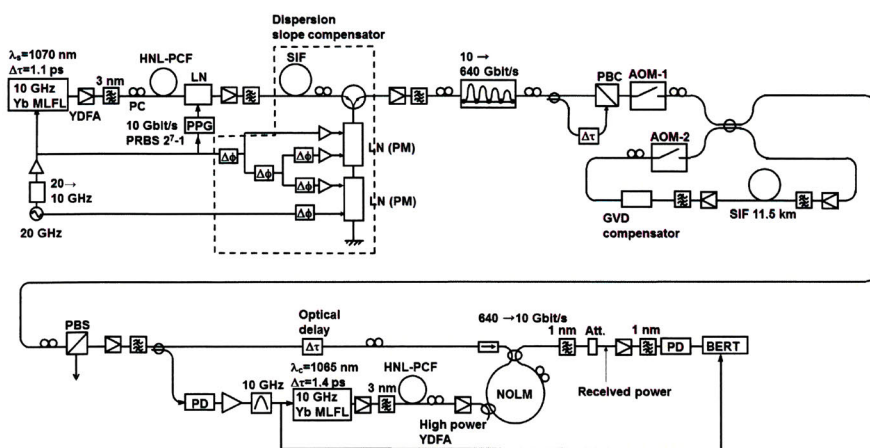


図3 波長 1.1  $\mu\text{m}$  帯 1.28 Tbit/s/ch 偏波多重伝送実験

# 論文審査結果の要旨

インターネットや高精細画像伝送などによる通信容量の急激な増大に伴い、現在光通信で用いられている波長  $1.55\ \mu\text{m}$  帯においては、光ファイバへ入射可能なパワー限界あるいは光増幅器の利得帯域制限により、その伝送容量が限界に近づきつつある。そこで、新たな光通信用波長帯として、波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯に高い関心が寄せられている。波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯は、イッテルビウム(Yb)元素を増幅媒質として用いることにより広帯域かつ高利得な光増幅が可能であるため、本波長帯における超大容量光伝送技術の実現が期待されている。著者は、 $1.1\ \mu\text{m}$  帯において高速な光時分割多重(OTDM: Optical Time Division Multiplexing)伝送を実現するために、高繰り返しピコ秒パルスレーザ光源、伝送路の群速度分散(GVD: Group Velocity Dispersion)および分散スロープ補償、ならびに超高速多重分離などの基盤技術を開発し、これにより  $1\ \text{Tbit/s/ch}$  を超える超高速伝送を達成した。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編 6 章より成る。

第 1 章は序論であり、新たな光通信用波長帯としての波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯の特徴について述べ、本研究の目的と論文の構成を示している。

第 2 章では、OTDM 伝送用のピコ秒パルス光源として作製した  $10\ \text{GHz}$  高調波再生モード同期 Yb ファイバレーザについて述べている。本レーザをソリトンレーザとして動作させるために、共振器内に異常分散を有するフォトニック結晶ファイバを挿入し、これにより超短パルス化を実現している。さらに高調波再生モード同期および PLL (Phase-Locked Loop) 技術を導入することで、高安定かつ低ジッタなピコ秒光パルスを生成している。本レーザは  $1.1\ \mu\text{m}$  帯における超高速通信用光源としてばかりでなく、光計測・計量標準用光源としても大変有用である。

第 3 章では、波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯 OTDM 伝送用に構築した GVD および分散スロープ補償などの各種要素技術と超短光パルスの伝搬特性について述べている。伝送路として用いた高屈折率ステップインデックスファイバは、シリカガラスの材料分散に起因する大きな GVD と高次分散成分に伴う分散スロープを有しており、これらが超高速光パルスの長距離伝送における超短ピコ秒光パルスの波形歪み要因として大きな障害となることを見出している。これらの波形歪みを補償するために、波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯に適したチャープファイバブラッググレーティング型 GVD 補償回路ならびにプリチャープ法による分散スロープ補償を新たに導入し、それらの有効性を実験的に明らかにしている。これは波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯における超高速光通信基盤技術として優れた成果である。

第 4 章では、 $1.1\ \mu\text{m}$  帯における  $160\ \text{Gbit/s/ch}$  OTDM 伝送実験について述べている。伝送路の GVD と分散スロープ補償による超短光パルス波形歪み抑制技術によって伝送距離を拡大し、OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) の限界となる  $300\ \text{km}$  の長距離伝送に世界で初めて成功している。この結果は波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯における超高速長距離光通信の可能性を明らかにしたものであり、極めて重要な成果である。

第 5 章では、OTDM 多重度の増大ならびに偏波多重方式の導入によるテラビット伝送を目指した高速化について述べている。特に、テラビット伝送に適した分散スロープ補償法として、光位相変調器を往復型の構成とし、かつ高調波の位相変調成分を重畳することにより、分散スロープ補償を広帯域化する手法を提案している。これによりサブピコ秒パルスに対しても波形歪みを大幅に低減し、 $1.28\ \text{Tbit/s/ch-58 km}$  の超高速伝送に世界で初めて成功している。

第 6 章は結論であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、波長  $1.1\ \mu\text{m}$  帯における超高速光パルス伝送の基盤技術を構築し、 $1\ \text{Tbit/s/ch}$  を超える超高速光伝送を達成したものである。これらの研究成果は  $1.1\ \mu\text{m}$  帯を新たな光通信用波長帯とする大容量光伝送システムの実現に有益な知見を与えるもので、光通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。